



Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

**RADIOHYDROGEOCHEMICKÁ
CHARAKTERISTIKA A GEOLOGICKÁ POZICE
VÝVĚRŮ VOD V KABELOVÉM TUNELU
HOLEŠOVICE-ČIMICE**

Antonín Lustik

Bakalářská práce

Věnováno památce RNDr. Jana Schröfela, CSc. (1943 – 2019)

Vedoucí: Mgr. Viktor Goliáš, Ph.D.

Konzultant: doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

2021

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a použil jsem jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

.....

V Praze dne

PODĚKOVÁNÍ

Především bych velice rád poděkoval svému školiteli Mgr. Viktoru Goliášovi, Ph.D. za přidělení skutečně fertilního tématu mé bakalářské práce, vstřícné a odborné vedení, za trpělivost při zpracování výsledků a za předávání svých bohatých zkušeností. Dále doc. RNDr. Jiřímu Bruthansovi, Ph.D. za jeho roli konzultanta, doc.RNDr. Václavu Kachlíkovi, CSc. za cenné rady při sestavování geologického profilu. Ing. Petru Cupalovi ze společnosti KO-KA s.r.o. jako kontaktní osobě provozovatele za umožnění vstupu do KT Holešovice, jeho osobní asistenci při každé návštěvě a doplnění cenných poznatků o dané problematice z jeho profesního hlediska. Děkuji také pracovníkům Přírodovědecké fakulty, jmenovitě Prof. RNDr. Martinu Mihaljevičovi, CSc. a Lence Jílkové za provedení chemické analytiky vod. Dále bych rád poděkoval svému spolužákovi Josefu Müllerovi, který mě zastoupil při první návštěvě KT a asistoval při odběru vzorků. V neposlední řadě také své rodině a svým blízkým, hlavně své partnerce Olze, za vytvoření ke studiu tolik potřebného klidného a spokojeného domácího prostředí za obrovskou trpělivost a pevné nervy, pro které bylo mé studium skutečně velikou zkouškou.

ABSTRAKT

Na trase kabelového tunelu Holešovice, konkrétně v místě jeho severního vyústění severně od Čimického háje byly zjištěny přítoky podzemních vod se zvýšenou radioaktivitou. Vody vyvěrají z proterozoických břidlic kralupsko-zbraslavské skupiny, blovického souvrství v hloubkách cca 100 m od povrchu, v úseku dlouhém přibližně 50 m. Vývěry jsou v pramenním úseku rozptýleny, celkový průtok je okolo 2 l/s. Voda je studená (11,1 – 12,3 °C), neutrální (pH 6 – 7,48), mírně redukční (Eh (ORP_H) 177 až 418 mV), hydrochemického molárního typu Ca-Mg-HCO₃, s celkovou mineralizací okolo 700 mg/l. Aktivita radonu (²²²Rn) byla stanovena v rozmezí 415 – 1 195 Bq/l a aktivita radia (²²⁶Ra) v rozmezí 0,18 – 5,3 Bq/l. Hodnoty ²²²Rn a ²²⁶Ra jsou relativně vysoké. V současné chvíli je to voda v pražské aglomeraci nejradioaktivnější. Voda je relativně agresivní, způsobuje destrukci betonového ostění a sráží se z ní kalcitové precipitáty se zvýšenou aktivitou ²²⁶Ra.

SUMMARY

On the northern end of the cable tunnel Holešovice close to Čimice Grove, groundwater inflows showing notable natural radioactivity have been found. This groundwater originates from protezoic slates of Kralupy-Zbraslav Group, Blovice Formation in depths approximately 100 meters under the surface, 50 meters along cable tunnel. Water springs are dispersed in the spring area, with the total discharge of 2 l/s. Groundwater is cold (11,1 – 12,3 °C), neutral (pH 6 – 7,48), slightly reduced (Eh (ORP_H) 177 up to 418 mV), of a hydrochemical molar type Ca-Mg- HCO₃, total mineralization being around 700 mg/l. Radon activities (²²²Rn) varies in between 415 – 1195 Bq/l and radium activity (²²⁶Ra) in between 0,18 – 5,3 Bq/l. Rn and Ra activities are relatively high. Currently, this is the most radioactive water within Prague agglomeration. This water is relatively aggressive as well, causing damage to the concrete lining of the cable tunnel and also allows calcite precipitates with an increased radium (²²⁶Ra) activity concentrations to form.

Obsah

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....	2
PODĚKOVÁNÍ.....	3
ABSTRAKT	4
SUMMARY	4
SEZNAM OBRÁZKŮ	6
SEZNAM PŘÍLOH	7
ÚVOD A CÍLE PRÁCE.....	8
REŠERŠE TÉMATU	10
Kabelové tunely v Praze.....	10
Kabelový tunel Holešovice	10
Proterozoické břidlice Bohemika a jejich podzemní vody	12
METODIKA.....	14
VÝSLEDKY	16
Geologické poměry v trase tunelu.....	16
Geologické poměry důlního díla KT-Holešovice.....	18
Podzemní vody v KT Holešovice.....	20
DISKUSE.....	27
ZÁVĚR.....	29
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	30
Příloha 1.	33
Příloha 2.	34
Příloha 3.	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1. Gama spektrometrie v trase KT Holešovice zobrazuje úsek od vstupní šachty J17 k nejseverněji položené šachtě J27 s vyznačením pozic vstupních šachet (J27, J256, J234 a J17) a interpretací radioaktivních prvků způsobujících zvýšené hodnoty radioaktivity. Měřeno přístrojem GT-30, osa x je v časové škále. (Goliáš a Schröfel 2013, nepublikovaná data).
- Obr. 2. Detail KT Holešovice, probíhající úpravy pažení a kabelových lávek před sanací (na stropě tunelu jsou patrné vysrážené minerály v podobě krápníků), foto J. Müller, 31. 5. 2019.
- Obr. 3. Detail KT Holešovice, po sanaci, úpravách pažení (nová žebra jsou vidět na stěnách tunelu) a odstranění usazenin ze stěn a stropu KT, foto V. Goliáš, 28. 1. 2020.
- Obr. 4. Přístroje použité pro měření fyzikálních parametrů vod a scintilační lahvička s odebraným vzorkem pro měření aktivity ^{222}Rn a ^{226}Ra , foto V. Goliáš, 28. 1. 2020.
- Obr. 5. Trasa KT Holešovice a její průmět do povrchové situace s vyznačením pozice vstupních šachet J22, J234, J256, J27 (podle Moučka a Cupala 2017).
- Obr. 6. Výřez z povrchové geologické mapy měřítka 1:50 000 (www.geology.cz) s vyznačením trasy a pozice KT Holešovice.
- Obr. 7. Zjednodušený geologický profil kabelovým tunelem Holešovice s vyznačením pozic zkoumaných vývěřů podzemních vod (Habrnál 1976, 1977, Röhlich a Fediuk 2005)
- Obr. 8. Pozice a vydatnosti vývěřů před sanací (31. 5. 2019)
- Obr. 9. Příklad na metrů 54,5 m v KT Holešovice po sanaci, foto Mgr. V. Goliáš 28. 1. 2020
- Obr. 10. Detail odlehčovacího vrtu s vytékajícím vývěrem na metrů 54,5 m v KT Holešovice po sanaci, foto V. Goliáš 28. 1. 2020
- Obr. 11. Pozice a vydatnosti vývěřů po sanaci (28. 1. 2020)
- Obr. 12. Aktivita ^{222}Rn ve vývěrech před sanací (31. 5. 2019). Čísla u vývěřů značí aktivity v Bq/l
- Obr. 13. Aktivita ^{226}Ra ve vývěrech před sanací (31. 5. 2019). Čísla u vývěřů značí aktivitu v Bq/l
- Obr. 14. Aktivita ^{222}Rn ve vývěrech po sanaci (28. 1. 2020). Čísla u vývěřů značí aktivity v Bq/l.
- Obr. 15. Aktivita ^{226}Ra ve vývěrech po sanaci (28. 1. 2020). Čísla u vývěřů značí aktivity v Bq/l

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Pozice vývěřů, fyzikální parametry naměřené aktivity ^{222}Rn a ^{226}Ra ve vodě v kabelovém tunelu Holešovice mezi šachtami J256 a J27 před provedením sanace 31. 5. 2019. Hodnoty průtoků významných přítoků uvedeny **tučně** * ve směru spádu kabelového tunelu.

Příloha 2. Pozice vývěřů, fyzikální parametry naměřené aktivity ^{222}Rn a ^{226}Ra ve vodě v kabelovém tunelu Holešovice mezi šachtami J256 a J27 po provedení sanace 28. 1. 2020. Hodnoty průtoků významných přítoků uvedeny **tučně**, odhadované průtoky uvedeny *kurzívou* * ve směru spádu kabelového tunelu.

Příloha 3. Chemická analýza odebraného vzorku podzemní vody a porovnání s archívními údaji.

ÚVOD A CÍLE PRÁCE

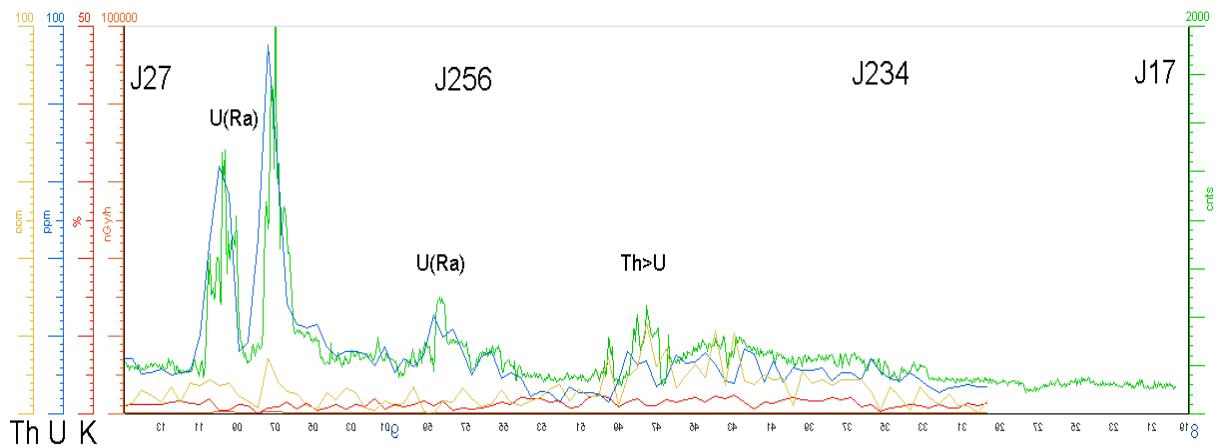
V roce 2013 kontaktovali RNDr. Jana Schröfela, CSc. (ČVUT) a jeho prostřednictvím následně i naši Přírodovědeckou fakultu zástupci společnosti KO-KA s.r.o. (Kolektory-Kanalizace s.r.o.) se zajímavým problémem. V kabelovém tunelu (KT) na území Prahy, byly při pravidelné údržbě odstraněny usazeniny odtokové stružky a poté odvezeny na skládku. Velkoobjemový kontejner s usazeninami však byl zachycen již všeobecně rozšířenými detektory radiace instalovanými na vstupu skládky a lokalita se tak ještě v roce 2013 dostala do hledáčku Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a jeho servisního orgánu Státního ústavu radiační ochrany (SÚRO).

V době od 17. 6. 2013 do 16. 6. 2014 bylo, pracovníky SÚRO, provedeno roční měření pro stanovení průměrné objemové aktivity radonu pomocí stopových detektorů RamaRn a pro určení průměrného dávkového příkonu záření gama pomocí termoluminiscenčních dozimetrů. Dozimetry byly exponovány vždy 3 měsíce a po té vyměněny. Naměřené hodnoty objemové aktivity radonu u úseku tunelu Trója – Kobylisy se v průměru pohybovaly okolo 3920 Bq/m^3 (Škábová a Navrátilová-Rovenská 2014).

Ve vzorcích odebraných precipitátů byly naměřeny vysoké aktivity ^{226}Ra . Vzorek 202/13 ^{226}Ra $3700 \pm 700 \text{ Bq/kg}$ a vzorek 203/13 ^{226}Ra $4000 \pm 700 \text{ Bq/kg}$ (Pilátová 2013).

Další odborná firma dle nařízení SÚJB také zhodnotila celkové alfa aktivity ve vypouštěných vodách. Bylo zjištěno, že voda přitékající z dotčené větve tunelu má celkové alfa aktivity zvýšené a překračuje uvolňovací úroveň pro vypouštění odpadních vod do povrchových vod podle Vyhlášky 307/2002 Sb. v platném znění $0,5 \text{ Bq/l}$. Nicméně aktivita čerpané směsi všech vod již normované úrovně nepřekračuje a může být volně vypouštěna do Vltavy (Neznal 2013).

V roce 2013 také za doprovodu ing. Petra Cupala (Ko-Ka s.r.o.) navštívili tuto část tunelu také RNDr. Jan Schröfel, CSc. (ČVUT) a školitel této práce Mgr. Viktor Goliáš, Ph.D. (PřF UK). Provedli gama spektrometrické profilování celé části KT od vstupní šachty J17 až po šachtu J27 (Obr. 1.). Zjistili, že radioaktivní precipitáty se srážejí pouze z některých z četných přítoků podzemních vod do KT a navrhli zadavateli (Ko-Ka s.r.o.) provedení podrobnějšího výzkumu.



Obr. 1. Gama spektrometrie v trase KT Holešovice zobrazuje úsek od vstupní šachty J17 k nejseverněji položené šachtě J27 s vyznačením pozic vstupních šachet (J27, J256, J234 a J17) a interpretací radioaktivních prvků způsobujících zvýšené hodnoty radioaktivity. Měřeno přístrojem GT-30, osa x je v časové škále. (Goliáš a Schröfel 2013, nepublikovaná data).

Neboť zadavatel již neprojevil další zájem o řešení této problematiky, byly další výzkumné práce na tomto nesporně zajímavém tématu dočasně přerušeny.

Pokračování výzkumu bylo v roce 2019 zadáno jako téma bakalářské práce. Cílem bakalářské práce pak bylo:

- Charakterizovat pozice jednotlivých vývěřů a jejich parametry (průtoky, fyzikální a chemické parametry)
- Korelovat pozice vývěřů s geologií tunelu.
- Změřit aktivitu ^{226}Ra ve vývěřech
- Změřit aktivitu ^{222}Rn ve vývěřech
- Zpracovat analýzu chemického složení vyvěrající vody
- Stanovit minerální podstatu srážených precipitátů

REŠERŠE TÉMATU

Kabelové tunely v Praze

Kabelové tunely (KT), kterých je na území Prahy několik, slouží k rozvodu el. sítí VVN (velmi vysoké napětí, 110 kV). Z elektro-rozveden na okraji Prahy, které jsou napájeny z elektráren v okolí hlavního města, vedou el. energii do transformačních stanic uvnitř Prahy, ve kterých se mění na energii nízkého napětí (NN), a ta je pak dále dodávána ke koncovým odběratelům (ústní sdělení Ing. Cupal).

Kabelový tunel Holešovice

Jako první vznikl v Praze tunel (KT) mezi pražskými městskými částmi Holešovice a Čimice na severním okraji Prahy, o kterém naprostá většina Pražanů nemá ani tušení. Je to ale podzemní dílo, které je pro každodenní život hlavního města velmi důležité, až nepostradatelné. Kabelový tunel Holešovice, jak je nazýván v terminologii PRE-distribuce, do jehož správy spadá a který je předmětem našeho zájmu, vede z elektro-rozvodny Sever v Čimicích, do prostoru pod budovou v Jankovcově ulici, kde se nachází TR Holešovice (transformátorová stanice Holešovice). Vede jím kabelová trasa VVN (velmi vysokého napětí) 110 kV o celkovém příkonu 62 MW (ústní sdělení Ing. Cupal). Udávaný příkon je určen měnicím transformátorem instalovaným v rozvodně TR Holešovice. Pro kabely 110 kV je ze strany PRE-distribuce požadavek na minimální přenosovou schopnost kabelu $P = 200 \text{ MW}$ (ústní sdělení Ing. Cupal). Jedná se o nejstarší kabelový tunel na území Prahy, který je se svými 4 416 metry zároveň nejdelším. Úsek ležící na pravém břehu Vltavy, který má délku přibližně 2 600 m. V době svého vzniku (rok 1976) u nás ještě nebyly s podobnými stavbami velké zkušenosti a tak jeho stěny tvoří pouze omítnuté pletivo (Drozd 1980), a při troše „štěstí“ si můžete sáhnout, některou z mnohých děr, na okolní horninu. Beton tvořící stěny je v některých místech stále omýván podzemní vodou, která ho díky svému chemickému složení narušuje. Takto destruován byl tunel do r. 2019, kdy jeho stav vyžadoval již nutně rekonstrukci (Obr. 2.). Při jeho sanaci podle projektu Moučky a Cupala (2017) byla v roce 2019 doplněna a posílena vnitřní konstrukční výztuž a vyměněny kabelové lávky, poté byla provedena injektáž prostoru za výztuží betonovou směsí (Obr. 3.).



Obr. 2. Detail KT Holešovice, probíhající úpravy pažení a kabelových lávek před sanací (na stropě tunelu jsou patrné vysrážené minerály v podobě krápníků), foto J. Müller, 31. 5. 2019.



Obr. 3. Detail KT Holešovice, po sanaci, úpravách pažení (nová žebra jsou vidět na stěnách tunelu) a odstranění usazenin ze stěn a stropu KT, foto V. Goliáš, 28. 1. 2020.

Proterozoické břidlice Bohemika a jejich podzemní vody

Proterozoikum bohemika je budováno horninami svrchního proterozoika tepelsko-barrandienské oblasti, na něž nasedají diskordantně komplexy hornin staršího paleozoika (Olmer a Kessl 1990). Nové datování zirkonů metodou U – Pb nám udává maximální stáří sedimentace v proterozoiku $559,8 \pm 3,8$ milionu let (Kurzweil a kol. 2015). Celkově má neoproterozoikum bohemika znaky vulkanického flyše tzn. výplně tektonicky aktivní rozšiřující se mořské pánve, zaplňované velkým množstvím siliciklastického materiálu z morfoloicky výrazného okolí (Cháb a kol. 2008). Neoproterozoikum Bohemika dělíme na kralupsko-zbraslavskou skupinu a na ní nasedající mladší štěchovickou skupinu. Kralupsko-zbraslavskou skupinu dále dělíme na blovické souvrství, které obsahuje bazalty a silicity a davelské souvrství s kyselými až intermediálními vulkanity. Štěchovická skupina obsahuje pouze siliciklastika (Kovanda a kol. 2001). Mocnost neoproterozoických vrstev je odhadována na 10 000 m (Cháb a kol. 2008). Z hydrogeologického hlediska můžeme svrchní proterozoikum rozdělit na dvě základní jednotky – nemetamorfované, nebo slabě metamorfované a na metamorfované (Kolman 1991). První jednotku tvoří jílovito-prachovité břidlice a droby doprovázené produkty podmořské vulkanické činnosti. V druhém případě to jsou fylity a fylitické břidlice.

Jsou doloženy velké rozdíly mezi puklinovými systémy ordovických břidlic, které mají nižší propustnost, než v jejich podložní proterozoické vrstvy (Hazdrová a kol. 1983). Uvádí se, že při ražbě tunelů pražského metra byly v proterozoických břidlicích a drobách zjištěny rozsáhlé puklinové systémy, na rozdíl ordovických břidlic, které vykazují větší plasticitu (Kapasová 1983). V neoproterozoiku bohemika je také známo více pramenů o vydatnosti $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ a větší, než v horninách spodního paleozoika (Filip 1957).

Výraznou horninou v neoproterozoických vrstvách Bohemika jsou buližníky. Buližník (z rus. buližnik = valoun, popř. hrubý dlažební kámen) (Röhlich a Fediuk 2005). Z petrografického hlediska jsou buližníky tvořeny převážně jemnozrnnou křemičitou hmotou a jejich šedé, černošedé až černé zbarvení je způsobeno příměsí minerálů vyskytujících se v jejich okolí. Jejich původ je spojován s podmořským vulkanismem, který produkoval křemenem bohaté roztoky a přítomností organismů s křemičitými schránkami (Habrnál 1976). Buližníky tvoří ploše čočkovité vložky v komplexu břidlic, prachovců a drob kralupsko-zbraslavské skupiny (Röhlich a Fediuk 2005). Zastoupené horniny vylučují souvislý oběh průlinových podzemních vod (Olmer a Kessl 1990). Neoproterozoické horniny jeví puklinovou propustnost s nízkou transmisivitou ($< 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) (Kolman 1991). Po chemické stránce jsou nejrozšířenějšími hydrochemické typy proterozoických podzemních vod Ca(Mg)-HCO₃ a Ca(Mg)-SO₄ (Olmer a Kessl 1990). Často se také vyskytuje natrium-hydrogenkarbonátový typ, jako například termy benešovsko-ústeckého zvodněného systému, nebo ve východní části novobydžovského zvodněného systému s většinou proterozoickým a staropaleozoickým podložím (Krásný a kol. 2012).

V Praze jsou kyselé podzemní vody známy z řady míst a jsou sledovány především ohledně svých nežádoucích účinků agresivity vůči základovým konstrukcím a pažení podzemních staveb. Problematické jsou zejména podzemní vody s vysokou koncentrací síranů. Působení síranů na betonové směsi má za následek chemické změny v cementovém tmelu (vysrážení ettringitu), které vedou ke zhoršení mechanických vlastností, např. zvýšené propustnosti, snížené voděodolnosti a pevnosti, zejména pevnosti v tahu (Krásný a kol. 2012).

Ke zvýšení obsahu síranů podzemních vod dochází v neoproterozoických a staropaleozoických břidlicích, obsahujících rozptýlené sulfidické minerály, nejčastěji pyrit (Krásný a kol. 2012). Významný zdroj obohacování neoproterozoických břidlic pyritem a dalšími rudními minerály mohou představovat hydrotermální jevy (Kurzweil a kol. 2015). Izotopy síry naznačují, že dominantním zdrojem síry byl síran z mořské vody (Pašava a kol. 1996) v kombinaci se zvláště silnými euxinickými (*euxinický* - označení mořského a brakického prostředí silně ochuzeného o kyslík a obsahujícího někdy i sirovodík H_2S . *Euxinické prostředí je charakteristické pro pánve se stagnující vodou (nedostatečná cirkulace), v nichž se ukládají tmavé sedimenty bohaté organickým uhlíkem a obvykle i pyritem. Částečným synonymem je anoxický, tj. bezkyslíkatý*, Petránek 1993) podmínkami (Kurzweil a kol. 2015). Proterozoické černé břidlice a silicity mohou obsahovat zvýšené množství uranu (Mrázek a Pouba 1995). Mohou se tak stát zdrojem radionuklidů uranové rozpadové řady v podzemních vodách (včetně ^{226}Ra). V oxickém prostředí se ^{226}Ra adsorbuje na pevné látky zvodněné vrstvy, nejčastěji na hydroxidy Fe a Mn (Stackelberg a kol. 2018). Naopak anoxické mineralizované nebo kyselé vody radium rozpouštějí a podporují tak jeho mobilitu (Szabo a kol. 2011). Radium může pronikat do podzemních vod řadou procesů, rozpadem rozpuštěných mateřských izotopů, alfa-zpětným odrazem, desorpcí z vodonosných povrchů, rozpouštěním pevných látek ve zvodnělé vrstvě, iontovou výměnou a loužením (Sturchio a kol. 2001).

Další významné agresivní složky obsažené v podzemních vodách proterozoických břidlic jsou nízká hodnota pH, obsah agresivního CO_2 , a tvrdost. Agresivita podzemních vod se mění v závislosti na petrografickém složení hornin. Akcesorické minerály nám také mohou napovědět podmínky vzniku neoproterozoických břidlic. Například vyšší obsahy zinku napovídají, že mořské sedimenty byly bohaté na organické složky (Ackermann a kol. 2019).

METODIKA

Jelikož nebyly známe geologické poměry na trase KT, bylo prvním krokem archivní studium. Byl opakovaně navštíven geologický archiv ČGS – GEOFOND, kde byly podle klíčových hesel vyhledány relevantní prameny – technické zprávy průzkumu pro ražbu realizované v trase tunelu.

Dále proběhlo studium dostupných mapových podkladů, geologických map povrchové části zájmové oblasti v měřítkách 1:50 000 a 1:25 000 dostupných on-line mapovém serveru ČGS (www.mapy.geology.cz).

Terénní práce započaly povrchovou rekognoskací lokality. První návštěva lokality proběhla 19. 4. 2019. Byl proveden povrchový průzkum a seznámení s lokalitou v prostoru Čimického háje a jeho okolí.

Dále následovaly tři návštěvy vývěrové lokality. Shodou šťastných okolností byly tři návštěvy měřící a vzorkovací kampaně v časové souhře s dlouhodobě plánovanou sanací této části kabelového tunelu, postižené pokročilou destrukcí betonového ostění vlivem vývěrů agresivních podzemních vod.

Při první návštěvě v samotném kabelovém tunelu, která se konala 31. 5. 2019, v čase před zahájením sanace, byla lokalizována a mapována místa přítoků do KT. Jako nulový bod metráže byla stanovena hrana šachty J27 na styku s chodbou tunelu. Dále byly při akci odebrány vzorky sedmi nejsilnějších vývěrů pro stanovení ^{222}Rn a ^{226}Ra . Na místě byly měřeny hodnoty průtoků, teplot, vodivosti, pH a Eh. Teplota byla měřena digitálním teploměrem Volcraft DET 3R. ostatní veličiny (pH, EH, EC) byly měřeny přístroji HANNA Combo Tester HI98129 a HANNA Tester HI98121 (Obr. 4.). Průtok byl měřen časově-objemovou metodou pomocí nádoby o objemu 390 ml a stopek. V případě, že nebylo možné technicky zachytit vodu do kalibrované nádoby, byl průtok určen odhadem.



Obr. 4. Přístroje použité pro měření fyzikálních parametrů vod a scintilační lahvička s odebraným vzorkem pro měření aktivity ^{222}Rn a ^{226}Ra , foto V. Goliáš, 28. 1. 2020.

Druhá návštěva dne 11. 6. 2019, byla zaměřena na odběr vzorků usazenin a sintrů. Tato akce proběhla právě v termínu sanace, kdy byla stěna navrtávána a injektována cementovou směsí do dutých prostorů vně tunelu. Odebráno bylo celkem devět vzorků precipitátů (sintrů). Právě probíhající vrtné práce byly také využity k odebrání vzorků hornin, ve kterých tunel procházel. Zabalené a označené vzorky okolních hornin nám byly předány pracovníkem fy. KO-KA s.r.o.

Poslední návštěva proběhla 28. 1. 2020, již po ukončení sanačních prací. Vlivem zatěsnění se podstatně změnilo odtokové parametry a v detailu i pozice jednotlivých vývěřů, které v této chvíli vytékaly převážně pouze z nově provedených odlehčovacích vrtů v bocích díla. Během této akce proto byly vývěry znovu mapovány a opět byla měřeny jejich průtoky, teploty, vodivosti, pH a Eh. Také byly odebrány vzorky pro stanovení ^{222}Rn a ^{226}Ra . Z nejvýznamnějšího vývěru na metráži 54,5 m byl odebrán vzorek na chemickou analýzu. Vzorek pro chemickou analýzu byl filtrován vakuovou aparaturou Sartorius s filtrem Milipore 0,5 μm .

Pro stanovení aktivity radonu (^{222}Rn) a radia (^{226}Ra) ve vodě bylo využito scintilační metody (LSC) v její nejvíce citlivé variantě – metody extrakční (Pates a Mullinger 2007) na přístroji TRIATHLER fy Hidex, Finsko (Haaslahti a kol. 2000). Pro kalibraci metody bylo využito kapalného standardu radia (^{226}Ra) typu EB-7 po jeho naředění. Správnost stanovení radonu a radia byla opakovaně ověřena na společné sadě standardů i vzorků ve spolupráci s laboratoří Polytechniky ve Wrocławu.

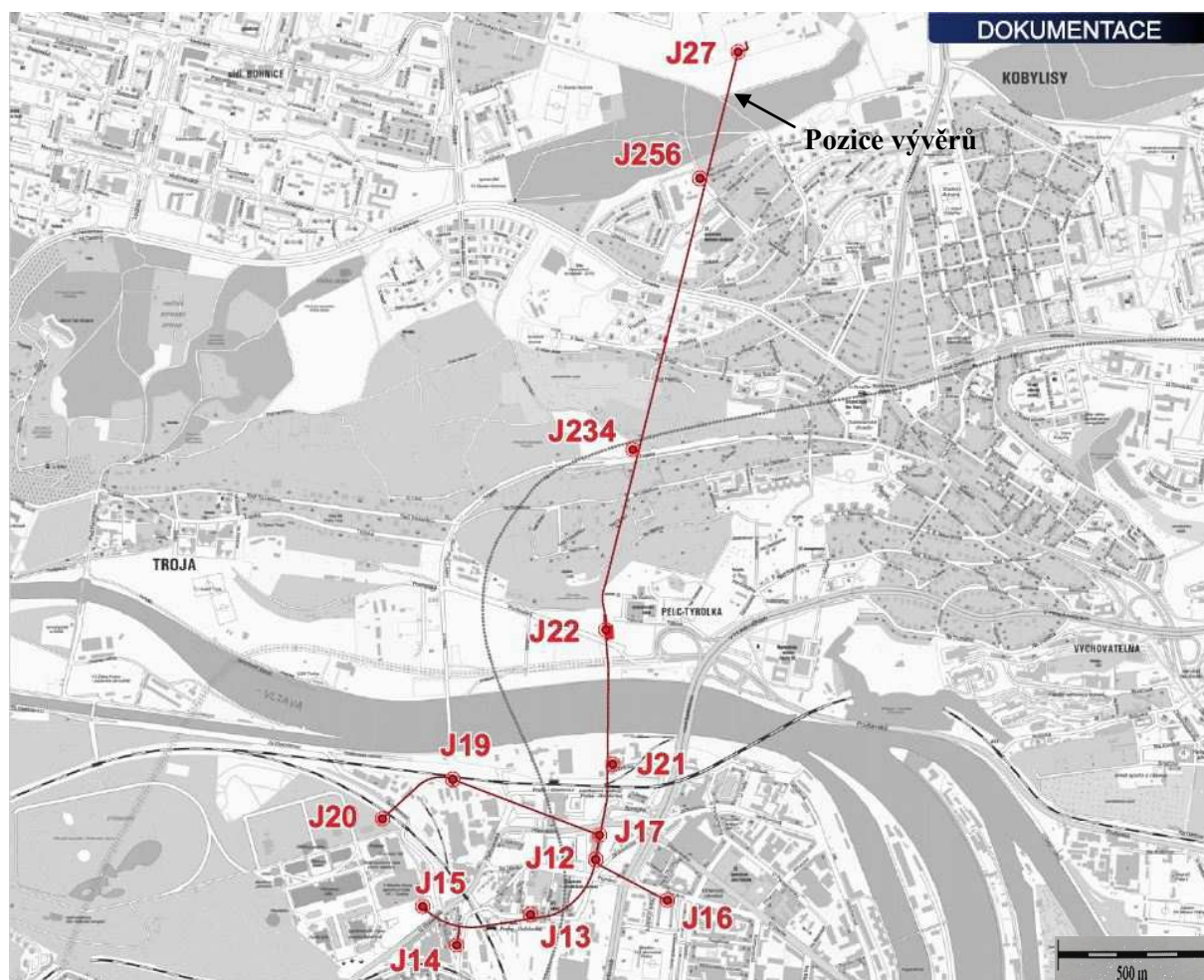
Chemická analýza odebraného vzorku vody byla provedena v Laboratořích geologických ústavů PřF UK. Hlavní kationty byly měřeny metodou optické emisní spektrometrie (ICP-OES), mikroelementy metodou hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS) a anionty byly stanoveny kapalinovou chromatografií.

Fázové složení precipitátů bylo měřeno práškovou RTG difrakcí (PXRD) na přístroji X'Pert PANalytical a vyhodnoceno v programu HighScore za použití databáze PDF-2 (ICDD).

VÝSLEDKY

Geologické poměry v trase tunelu

Z mapy trasy tunelu (Obr. 5. a 6.) vyplývá, že tunel svojí severní částí prochází okrajem synklinoria pražské pánve a svým ukončením vchází do barrandienského proterozoika.



Obr. 5. Trasa KT Holešovice a její průmět do povrchové situace s vyznačením pozice vstupních šachet J22, J234, J256, J27 (podle Moučka a Cupala 2017).

Nicméně je z geologické povrchové mapy (Obr. 6.) jasné, že se oblast nachází v oblasti silně zakryté, kde převážnou část plochy tvoří kvartérní pokryv a podložní (skalní) horniny vycházejí jen v malých ostrůvcích. Velká část sledované oblasti se nachází v prostoru Čimického háje. Čimický háj kopíruje přírodní svahový předěl tvořený buližnickým hřebenem probíhajícím ZJZ – VSV směrem, až k městské části Ďáblice, kde vrcholí horou Ládví (359 m). Na okraji Čimického háje, v ulici Hovorčovická, na jejím konci, se nachází vstup do šachty J256. Po průchodu Čimickým hájem směrem na sever (cca 200 m) se nachází severní konec lesního porostu, kde je umístěna elektrorozvodna Sever do níž kabelový tunel ústí, a kde se nachází vstupní šachta J27. Zhruba 100 metrů severně od šachty J256 se nachází na vrcholu hřbetu výchoz buližníku s náznaky puklinového systému. Buližníky, díky svému složení, převážně 96 – 99 % SiO₂ (Stárková a kol. 2018) mají velkou odolnost vůči erozi. Vzorky buližníků odebrané na lokalitě měly světle šedou barvu, místy vtroušené silicifikované reliktů okolních břidlic, bez viditelné laminace a v puklinách byly usazeny jílové minerály. Systémy puklin měly směr sklonu a sklon 349/59° a 351/63°.

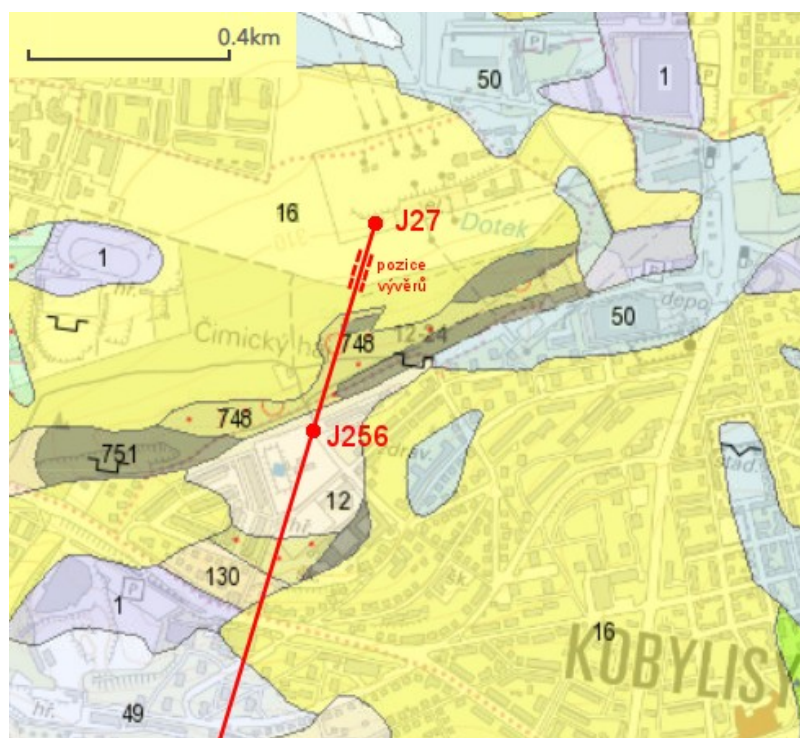
Legenda:

Terciér a Kvartér

- 1 – Antropogenní sedimenty
- 12 – Deluviální hlína
- 16 – Spraš a sprašová hlína
- 49 – Písčito-hlinitý a hlinito-písčitý sediment
- 50 - Písek
- 130 – Štěrky a písčité štěrky

Neoproterozoikum

- 748 – Droby, prachovce
- 751 – Buližníky (silicity)



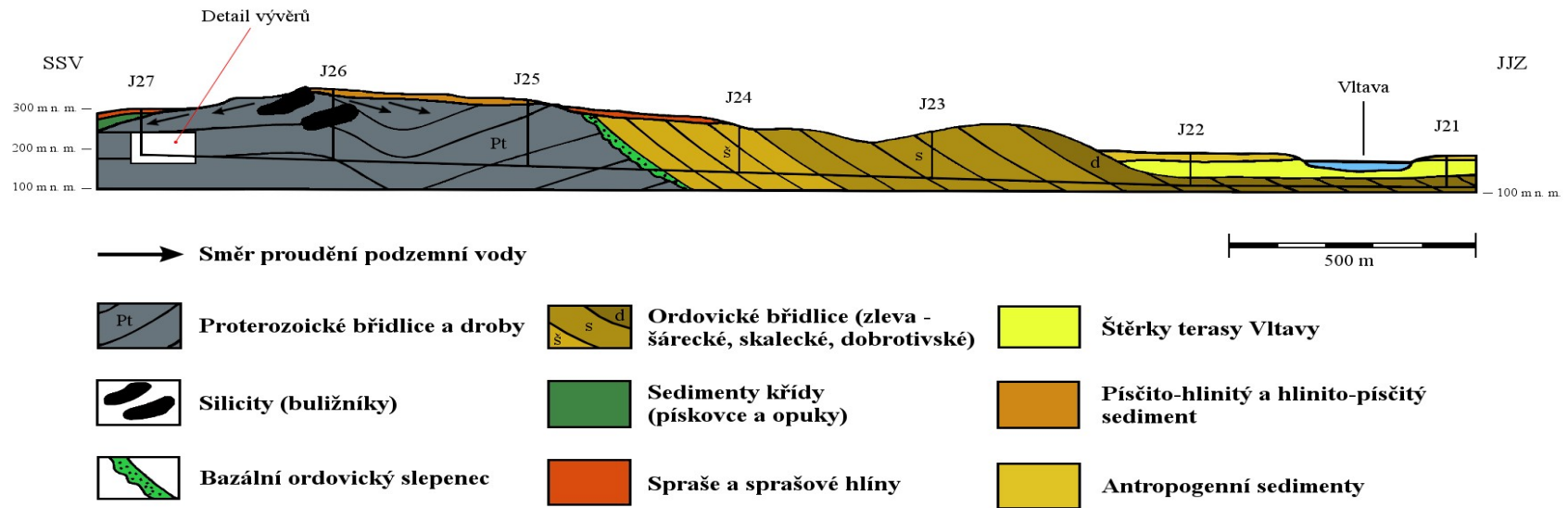
Obr. 6. Výřez z povrchové geologické mapy měřítka 1:50 000 (www.mapy.geology.cz) s vyznačením trasy a pozice KT Holešovice.

Další výchozy buližníku se nacházejí asi 1 km západně, kde byly historicky dobývány malými lůmkami. Zde jsou na výchozech buližníků viditelné časté křemenné žíly na puklinách vyplněné drobnými

krystalky křemene. V lůmcích byly stanoveny puklinové systémy o parametrech 348/56°, 326/45°, 353/74°, tedy přibližně shodné, jako na předchozí lokalitě.

Geologické poměry důlního díla KT-Holešovice

Během archívního studia se nám nepodařilo získat zprávu ze samotné ražby tunelu. Není jasné, kde se nachází, resp. zda byla vůbec při ražbě trasa geologicky dokumentována. Hlavním zdrojem informací je proto zpráva o inženýrsko-geologickém průzkumu realizovaném v jeho trase před započítím vlastní ražby (Habrnál 1976). Přehled o geologické stavbě je nastíněn v inženýrsko-geologické mapě podél trasy tunelu, ve které jsou vyneseny typy pokryvných útvarů, hydrogeologické údaje a stratigrafické zařazení hornin skalního podloží. Geologické poměry v trase kabelového tunelu jsou různorodé, geologická stavba je relativně složitá a intenzita tektonického postižení je v jednotlivých úsecích výrazně odlišná, neboť kabelový tunel ve své délce prochází několika stratigrafickými jednotkami. Tyto jednotky mají odlišný charakter, různé petrografické složení a tím pádem i jiné puklinové systémy. Protože je tunel v úseku našeho zájmu veden ve větších hloubkách, horninový masiv je zcela kryt betonovou výztuží, jsou konkrétní pozice geologických rozhraní v detailu nejasné a dají se pouze odhadovat. Ze zjištěných archívních údajů i vlastních poznatků byl vytvořen zjednodušený geologický profil (Obr. 7).



Obr. 7. Zjednodušený geologický profil kabelovým tunelem Holešovice s vyznačením pozic zkoumaných vývěřů podzemních vod. (sestaveno podle Habrnála 1976, 1977 a Röhlich a Fediuka 2005)

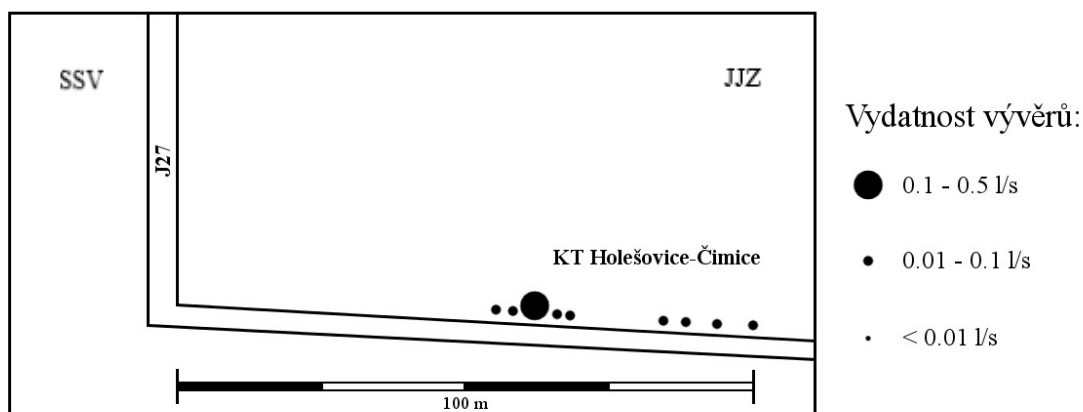
Vstupní šachta J21 se nachází v Praze – Holešovicích, v Jankovcově ulici č.p. 960/40, v budově Technického a dokumentačního muzea PRE, na levém břehu Vltavy, poblíž stanice metra trasy „C“ Holešovické nádraží. Šachta prochází vertikálně antropogenními sedimenty, šterky říční vltavské terasy a poté vstupuje do vrstev ordovických břidlic, ve kterých je veden KT Holešovice, do kterého tato šachta ústí. Těleso KT postupně od jihu prochází ordovickými břidlicemi dobrotivského, skaleckého a šareckého souvrství. Na přechodu z ordovických vrstev do neoproterozoických můžeme jen tušit bazální ordovický slepenec, ovšem při absenci zprávy z ražby tunelu to nemůžeme potvrdit. Drobné relikt, odhalené v nedaleké zoologické zahradě, nám však naznačují jeho možný výskyt (Röhlich a Fediuk 2005). Neoproterozoické břidlice, které navazují v severním směru na břidlice ordovické, obsahují polohy silicitů. V trase tunelu se zřejmě silicity nevyskytují, pouze v okolí šachty J256 jejich výskyt jistý, protože při geologickém průzkumu zde havaroval průzkumný vrt v okrajové zóně silicitového tělesa (Habrnál 1976). Námi sledovaný úsek tunelu s pramenními vývěry vod se zvýšenou radioaktivitou se nachází pod nejvyšším bodem oblasti, tvořeným hřbetem neoproterozoických silicitů, který je odolnější proti erozi než okolní neoproterozoické břidlice. Tento hřbet tak představuje přirozenou hranici ve směru proudění podzemní vody. Severním směrem navazuje na svrchno-křídové vrstvy, které tvoří přirozený vodní rezervoár. V šachtě J27 byl křídový pokryv zastížen do hloubky 24 m. Do konečné hloubky 111 m byla tato šachta ražena v horninách neoproterozoika. Mezi šachtami J25 a J27 prochází tunel pouze neoproterozoickými horninami. Petrograficky zde rozlišujeme dva základní typy hornin. Jsou to jílovito-prachovité až drobové břidlice a silicity (buližníky). Hranice mezi těmito horninami nejsou zřetelné a existuje více přechodových typů hornin, které při běžném makroskopickém pozorování nelze odlišit. Rozborem horninového materiálu z vrtných jader získaných při sanační akci bylo zjištěno, že v celém úseku s vývěry zkoumaných pramenů v metrších 45 – 96 m od šachty J27 se vyskytují pouze břidlice. Buližníky nebyly navrtány ani v jednom případě. Makroskopicky to jsou masívnější, jemné, středně až tmavě šedé břidlice s hrubší laminací, střípkovitě se rozpadající. Břidlici řídce protínají po foliaci i puklinách žilky světlého karbonátu. V žádném ze zkoumaných vzorků nebyla makroskopicky příměs sulfidů (pyritu). Přítomnost buližníků přímo v profilu tunelu tak nebyla potvrzena, nelze však vyloučit, že se některé jeho čočkovité těleso nevyskytuje v prostoru nad tunelem.

Podzemní vody v KT Holešovice

Tunel byl vyražen v roce 1976 a již v roce jeho uvedení do provozu (1980) byla vypracována zpráva, která navrhovala několik variant technického řešení, které by vedly ke snížení přítoků do kabelového tunelu (Drozd 1980). Je tedy zřejmé, že problém průsaku vod zde byl od samého počátku. V průběhu let fungování KT Holešovice se vysrážely na jeho počvě

a stěnách mocné vrstvy precipitátů (sintrů), které byly během pravidelných údržbových prací postupně odstraňovány a odváženy na skládku. Tyto vysrážené vrstvy obsahovaly látky a minerály, které voda vyvěrající skrz chatrné a místy perforované stěny tunelu vymývala v okolních horninách. Kabelový tunel měl také velký vliv na hladinu podzemních vod v blízkém okolí, kde došlo k trvalému snížení hladin ve studních ve velkém rozsahu. (Kovanda a kol. 2001).

Vývěry podzemních vod se projevují v celé délce kabelového tunelu, jsou sice malé vydatnosti, ovšem jejich počet je vysoký (v řádu stovek). Zvýšená celková radioaktivita se projevuje pouze v jeho severní části, mezi šachtami J256 a J27. Tento fakt je znám již od rekognoskace v roce 2013 (Obr. 1.). Souhrnně jsou fyzikální parametry vod zjištěné v termínech 31. 5. 2019 a 28. 1. 2020 uvedeny v Příloze 1. a Příloze 2. Přítoky se před sanací (Obr. 8.) jeví jako roztráštěné, většinou o malých průtocích s vydatností max. 0,3 l/s, daly se rozčlenit na dvě skupiny (55 až 66 m a 83 až 100 m) ostatní vývěry byly nevýznamné. Vlivem injecktáže se odtokové poměry částečně změnily.



Obr. 8. Pozice a vydatnosti vývěrů před sanací (31 . 5. 2019)

Po sanaci nyní vytéká většina vod z odlehčovacích vrtů, provedených nově do boků tunelu přes betonovou stěnu až do okolní horniny (Obr. 9. a 10.).

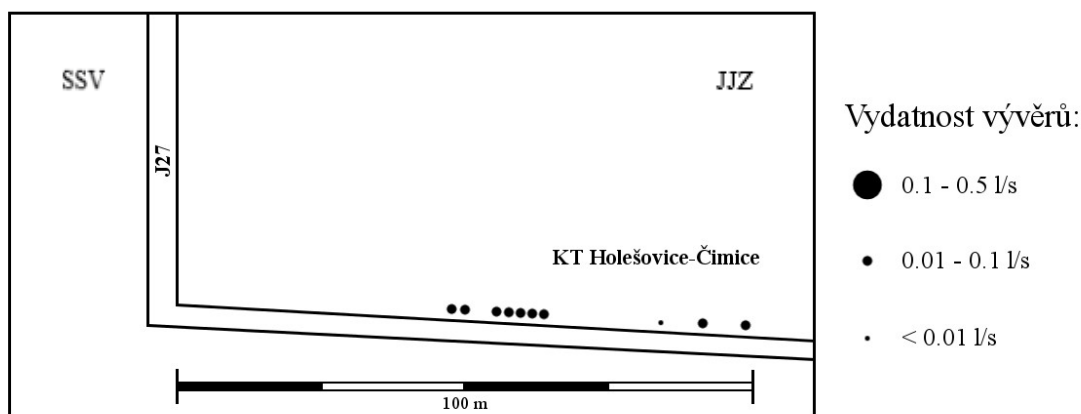


Obr. 9. Přítok na metrži 54,5 m v KT Holešovice po sanaci, foto V. Goliáš 28. 1. 2020



Obr. 10. Detail odlehčovacího vrtu s vytékajícím vývěrem na metrži 54,5 m v KT Holešovice po sanaci, foto V. Goliáš 28. 1. 2020

Odlehčovací vrty byly provedeny přibližně v původních pozicích nejvydatnějších vývěřů. Z pozic vývěřů (Obr. 11.) můžeme usuzovat, že díky zvoleným pozicím odlehčovacích vrtů byl před sanací nejvydatnější vývěř zatěsněním rozložen do více drobnějších vývěřů.



Obr. 11. Pozice a vydatnosti vývěřů po sanaci (28 .1 .2020)

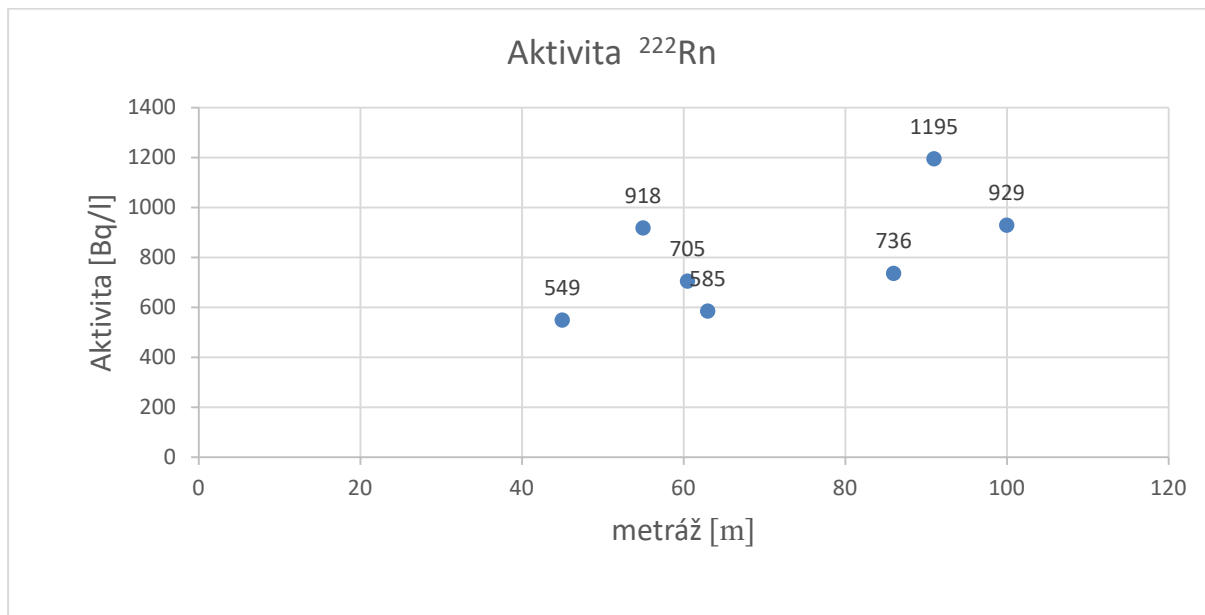
Vývěry po sanaci můžeme opět rozdělit do dvou skupin (46 m – 62 m a 79 m – 97 m). Tento fakt je zřejmě dán puklinovým systémem okolních hornin a jejich zvodněním.

Voda je neutrální (pH 7,05 – 7,46), studená (11,9 – 12,3 °C), nejteplejší vývěř se nacházel na pozici 79 m vpravo (12,3 °C). Na mineralizaci podzemních vod neměla sanace výraznější vliv, je podobná jako před sanací. Konduktivita je velmi podobná v celém vývěřovém úseku (46 m – 62 m a 79 m – 97 m) a to v rozmezí 703 – 1 151 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

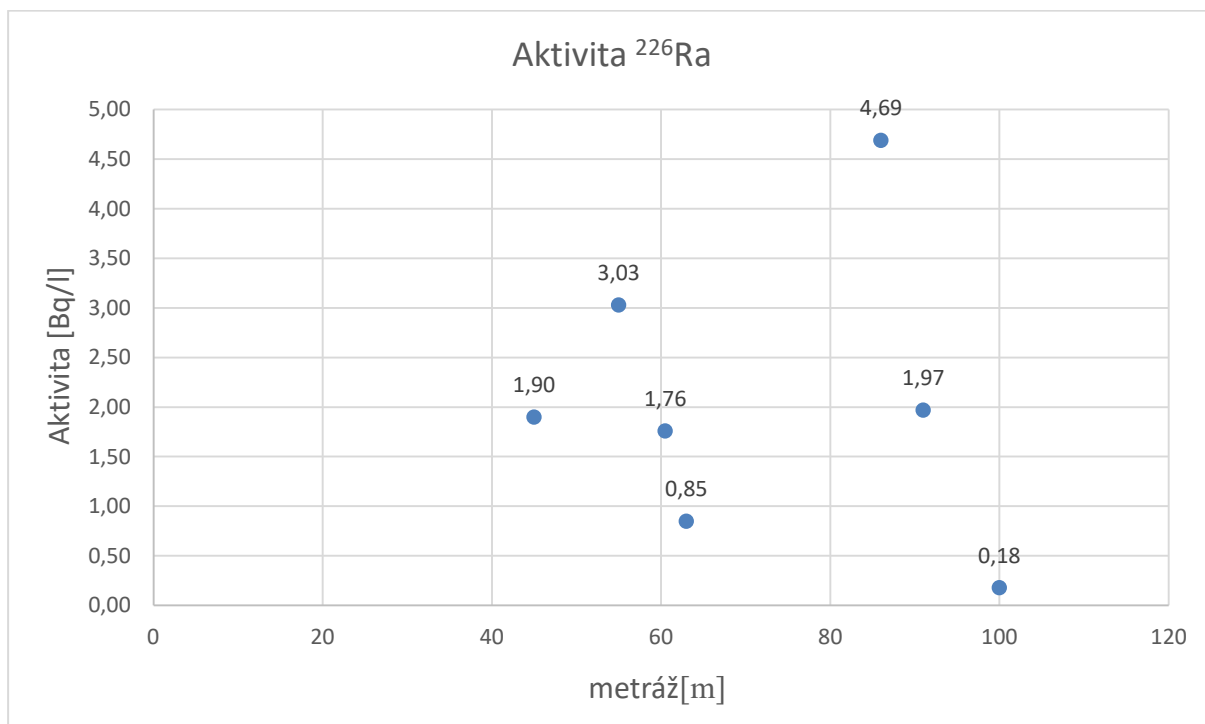
Aktivita ^{222}Rn se pohybovala před sanací rozmezí 549 – 1 195 Bq/l, nejaktivnější vývěř se nacházel na pozici 91 m od šachty J27. Po sanaci byl nejaktivnější vývěř na pozici 97 m o aktivitě 985 Bq/l.

Aktivity ^{226}Ra se pohybují v rozmezí 0,18 – 5,3 Bq/l. Před sanací byl nejaktivnější vývěř (4,69 Bq/l) na pozici 86 m od šachty J27, a po sanaci je nejaktivnější vývěř (5,3 Bq/l) přibližně ve stejných místech, na pozici 84 m od šachty J27. Nízkou radioaktivitu ^{226}Ra má vzorek směsné podzemní vody odebraný na výtok z šachty J27, a to pouze 0,8 Bq/l. Naopak směsná voda v odtokovém korytu na metráži 101 m za všemi zkoumanými vývěry v KT má aktivitu vysokou 3,3 Bq/l. Šachta J27 totiž odvodňuje hlavně křídové sedimenty, které zřejmě v tomto konkrétním případě aktivaci vody nezpůsobují, i když může křída jistě své podloží vodou významně dotovat. K hlavní aktivaci podzemní vody radionuklidy tedy dochází skutečně až v horninách neoproterozoika.

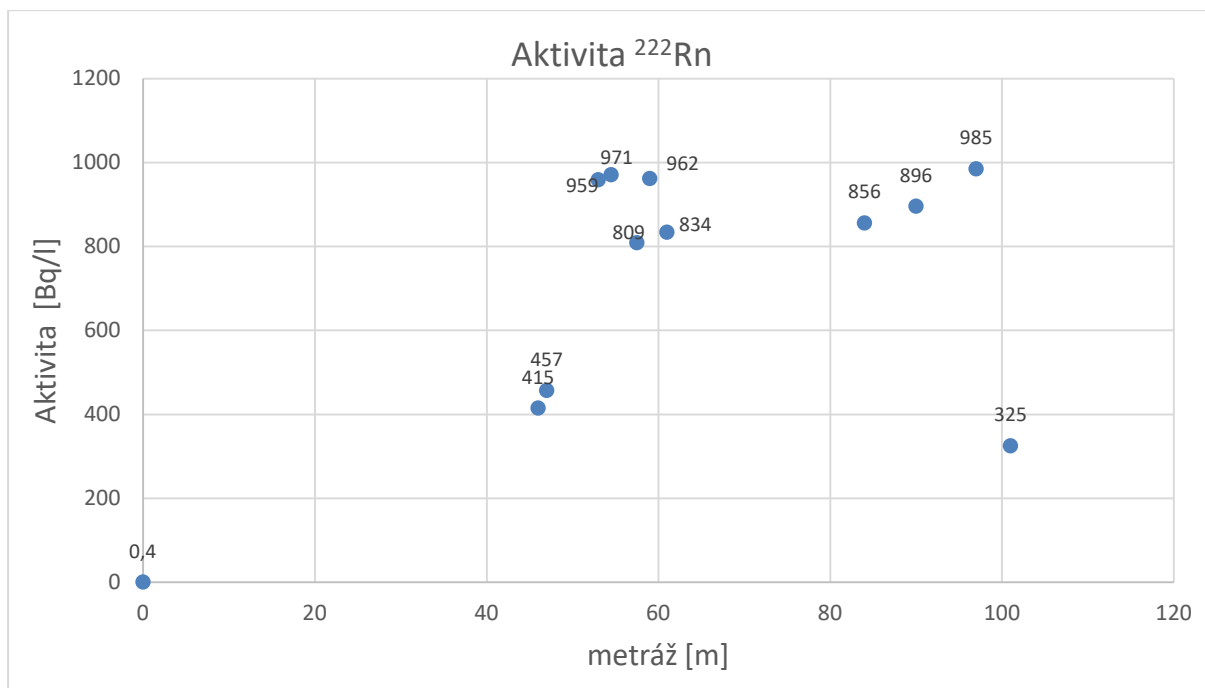
Grafické znázornění rozložení aktivit ^{222}Rn a ^{226}Ra před sanací je na Obr. 12. a 13. a po sanaci je na Obr. 14. a 15.



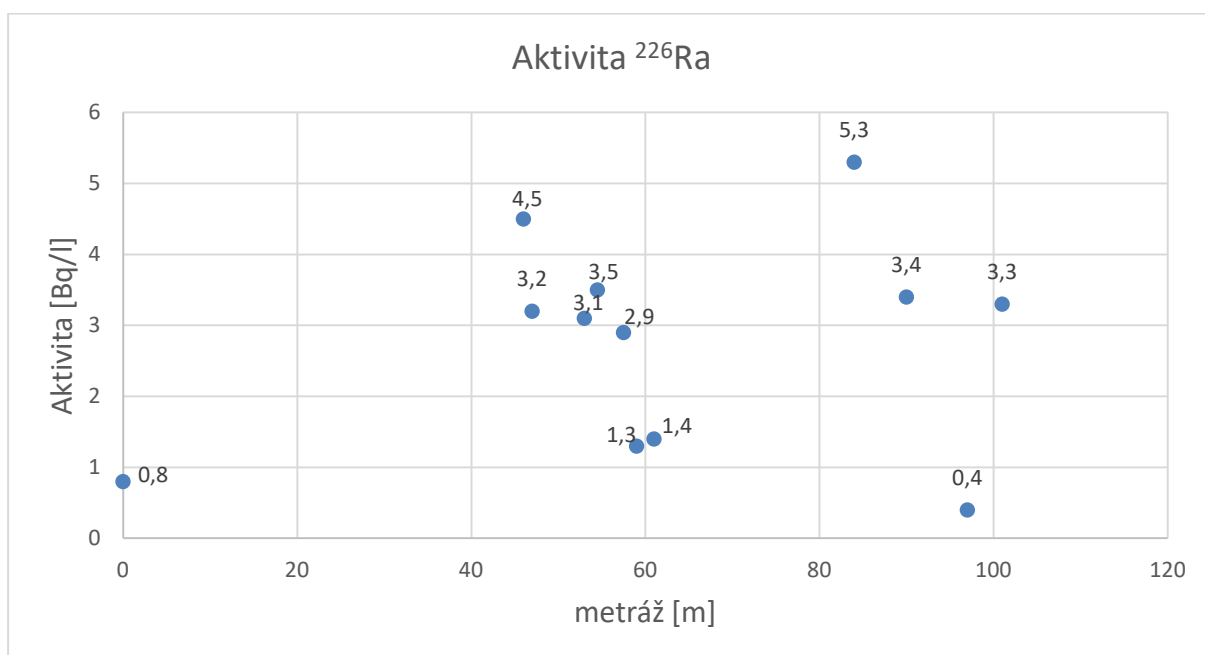
Obr.12. Aktivita ^{222}Rn ve vývěrech před sanací (31. 5. 2019). Čísla u vývěrů značí aktivity v Bq/l



Obr. 13. Aktivita ^{226}Ra ve vývěrech před sanací (31. 5. 2019). Čísla u vývěrů značí aktivitu v Bq/l.



Obr. 14. Aktivita ^{222}Rn ve vývěrech po sanaci (28. 1. 2020). Čísla u vývěrů značí aktivity v Bq/l.



Obr. 15. Aktivita ^{226}Ra ve vývěrech po sanaci (28. 1. 2020). Čísla u vývěrů značí aktivity v Bq/l

Chemická analýza podzemní vody vzorku z pozice 54,5 m je uvedena v Příloze 3. Podzemní voda v KT Holešovice, obsahuje zvýšené koncentrace kationtů Na, Ca, Mg a K, a z aniontů SO_4 a HCO_3 , což se dá k charakteru prostředí, kterým migruje očekávat. Poněkud vyšší obsah mikroprvků je zaznamenán u Co, Ni, Mo a Zn. Je to nízcce až středně mineralizovaná voda, hydrochemického

molárního typu Ca-Mg-HCO_3 se zvýšeným obsahem uranu ($10,8 \mu\text{g/l}$). Nízký je obsah hliníku, který reflektuje nízkou mobilitu Al při neutrálním pH.

Z vody se sráží množství precipitátů a to jak pevných bílých, karbonátového vzhledu, tak i měkkých železitých hydroxidů a podřízeně také černé oxidy manganové. Je pravidlem, že v místech s vysokým průtokem precipitují pouze bílé karbonátové sintry, zatímco na místech s průtokem nízkým se rozvíjí úzká zóna obarvená povrchově Mn-oxidy a dále precipitují rezavé Fe-hydroxidy. Nejčastěji je přítomen středně pevný karbonátový precipitát rezavě zbarvený Fe-hydroxidy, který tvoří i objemově převládající sediment v odtokovém žlábků. RTG práškovou difrakcí byl tento převládající typ precipitátu identifikován jako kalcit. V průběhu zpracování této bakalářské práce bylo konstatováno, že další hodnocení mineralogie precipitátů je již nad rámec řešení a dále proto nebylo studováno.

DISKUSE

Chemická analýza našeho vzorku vykazuje poměrně vysoký obsah uranu, vysoké aktivity radia i radonu má většina vzorků ze systematického vzorkování studovaných vývěřů.

Neoproterozoické břidlice Barrandienu obsahují zvýšené množství uranu, díky obsahu organické hmoty, na kterou je uran vázán. Uranová zrudnění rozptýlená v horninách dosahují až 0,2 %, také silicifikované sedimenty a křemičité hydrotermity, jsou obohacené rudní mineralizací, tedy i uranem a mohou být také zdrojem radioaktivity v podzemní vodě (Mrázek a Pouba 1995). V proterozoiku bohemika se vyskytují, ohledně mineralizace dva druhy černých břidlic, normální (NBS – Normal black shales) a bohaté na rudní minerály (HMBS – High metal-rich black shales) (Ackermann a kol. 2019). Horniny, kterými prochází KT Holešovice můžeme řadit spíše k normálním břidlicím. Při makroskopickém pozorování několika vzorků na nich nebyly patrné výskyty rudních minerálů, ani v břidlicích velmi běžný pyrit, který je jejich nejčastějším sulfidem (Pašava a kol. 1993). Zkoumaná podzemní voda vyvěrající v KT má i relativně nízké obsahy ostatních kovů v chemické analýze. Také název černé břidlice je poněkud zavádějící, vlivem obsahu organické hmoty nabírá spíše šedou barvu (Kurtzweil a kol. 2015). Mineralizace uranem se zřejmě v podobě lokálního výskytu v těchto břidlicích vyskytuje, jejich důkazem je obsah radionuklidů uranové rozpadové řady ve vývěřech podzemní vody v KT.

Aktivity radonu v námi zkoumaných vývěřech tvoří po sanaci homogennější skupinu s bližšími krajními hodnotami. Rozdíly hodnot ^{222}Rn před a po sanaci mohou být nejspíše způsobeny vyplněním prostor mezi vnějším pláštěm tunelu a samotnou horninou betonovou směsí a zamezením průniku vzduchu do horninového prostředí. Radon (^{222}Rn), tak nemůže z vody unikat dříve než ve vývěřech v samotném tělese KT. Po sanaci tvoří centrální skupina pramenů velmi homogenní skupinu osmi zdrojů s aktivitami v rozmezí 809 – 985 Bq/l ^{222}Rn a aktivity prudce klesají na obou stranách v nižších i vyšších metrážích, kde jsou patrně okraje úseku horninového masivu způsobujícího zvýšenou aktivaci podzemních vod (Obr. 13.). V nízkých metrážích, v severní části zkoumaného úseku zůstávají však vysoké aktivity ^{226}Ra , ale v jižní části aktivita ^{226}Ra klesá (Obr. 14.). Celkovou délku úseku s horninami způsobujícími aktivaci podzemní vodu radionuklidy uranové rozpadové řady můžeme tak stanovit na zhruba 50 m, resp. v detailu na dvě zóny o délce zhruba 20 m, oddělené cca 10 m hluchým úsekem bez výraznějšího zvodnění. Situace nebyla před sanací dobře zřetelná, částečně důvodem menšího počtu odebraných vzorků, a také přítomností roztržitějšího souboru aktivity ^{222}Rn (Obr. 11.). Přítomnost některých vyšších hodnot aktivit ^{222}Rn před sanací lze vysvětlit přirozenou časovou variací radonu ve vodě (Hynie 1963). Snížení svých hodnot po sanaci zaznamenal oxidačně-redukční potenciál vyvěrajících vod. Důvod může být stejný jako v případě aktivity ^{222}Rn , nedochází takovou mírou k jejich oxidaci v okolním masivu v méně proplyněném okolí KT než před sanací.

Chemický rozbor podzemní vody odebraného vzorku z metráže 54,5 m vykazuje odlišný typ podzemní vody (Ca-Mg-HCO₃, při celkové mineralizaci 702 mg/l), než chemická analýza provedená při geologickém průzkumu z vrtu na pozici budoucí šachty J256 (Na-SO₄-Cl-HCO₃, při celkové mineralizaci 606 mg/l), (Habrnál 1976). Je ovšem nutno podotknout, že podmínky odběru byly v průběhu let značně rozdílné. Zatímco současné vzorky byly odebrány z vývěrů v perforaci stěn kabelového tunelu, který byl v té době součástí hydrogeologického prostředí již 44 let, tak historické vzorky z geologického průzkumu byly odebrány z průzkumných vrtů (Habrnál 1976). Také pozice odběru našich vzorků je přibližně 250 m severněji a i to může mít vliv na chemickou charakteristiku podzemních vod, neboť hydrogeologické prostředí v trase tunelu je velmi pestré. Starší chemická analýza vykazovala zvýšený obsah Na a Cl iontů zřejmě antropogenního původu (solení silnic, únik splaškových vod). Velmi nízká koncentrace dusičnanů v obou analýzách jasně ukazuje na jejich odstranění v redukčních podmínkách. Koncentrace dusičnanů i v čistých ledních oblastech neklesá pod 5-10 mg/l. Bohužel ve vzorcích odebraných při geologickém průzkumu před ražbou kabelového tunelu nebyla zkoumána úroveň radionuklidů, nicméně žádné z těchto vzorků také nebyly situovány v geologické pozici se zvýšenou radioaktivitou podzemních vod zkoumanou námi.

Úroveň radioaktivity v současnosti odebraných vzorků je relativně vysoká, zejména naměřené hodnoty ²²⁶Ra vykazují vysoké úrovně. Radioaktivita radonu je také vyšší než v běžných podzemních vodách, ovšem zdaleka nedosahuje hodnoty „minerální vody pro léčebné využití“, za kterou se považuje podle lázeňského zákona (Zákon č. 164/2001 Sb.) podzemní voda s obsahem radonu vyšším než 1,5 kBq/l. Za zmínku stojí také zvýšené hodnoty uranu, jež vzorky podzemní vody obsahovaly. V každém případě se jedná o podzemní vodu s nejvyšší zatím zjištěnou úrovní radioaktivity na území Prahy. Možnou konkurenci mohou představovat silurské černé břidlice (liteňské vrstvy), ve kterých byl zjištěn zvýšený obsah uranu (až 72 µg/l) ve vodách při hydrochemickém průzkumu jihozápadního uzávěru synklinoria pražské pánve (Marešová 1974). I při vyšších hodnotách radioaktivity podzemní vody ve vývěrech v KT Holešovice je jejich vypouštění do Vltavy bezpečné. Reálný odhad zvýšené dávkové zátěže jednotlivce způsobeného vypouštěním nečištěné odpadní vody z KT Holešovice je menší než 1 µS/rok. Vzhledem k objemovým aktivitám ve vypouštěné vodě a vysokému faktoru zředění (7779 krát) vypouštěné odpadní vody lze prakticky vyloučit nahromadění radionuklidů v životním prostředí v takové míře, která by mohla ohrozit zdraví osob nebo životní prostředí (Nezval 2013).

ZÁVĚR

Zjištění zkoumaných vývěřů podzemních vod s vysokým obsahem přírodních radionuklidů je na území Prahy velkým překvapením, neboť dosud nebyly objeveny podzemní vody s vyšší úrovní naměřené radioaktivity, která zde dosahuje až 1195 Bq/l ^{222}Rn . Naopak jejich chemické složení, je ve zkoumané oblasti obvyklé. Voda je typu Ca-Mg-HCO₃, což je nejběžnější hydrochemický typ neoproterozoických hornin bohemika, s celkovou mineralizací 702 mg/l, neutrální, studená. Kromě vysoké aktivity rádia (^{226}Ra) až (5,3 Bq/l) a Rn má voda také vyšší obsah uranu, ale obsah ostatních mikroelementů příliš zvýšený není. Voda, svůj radioaktivní obsah získává ve styku s horninou, reprezentovanou zde neoproterozoickými šedými jemnými břidlicemi, i když k její genezi mohou hovořit také chemogenní silicity (bulžníky), vycházející na povrch nad prostorem vývěřů. Horninový sled náležící kralupsko-zbraslavské skupině, blovickému souvrství v této části barrandienského neoproterozoika neobsahuje zvýšené obsahy radioaktivních prvků, ani není součástí pruhů klasických kovonosných černých břidlic. Nicméně popisovaná lokalita je zřejmě výjimkou, kdy je drobná mineralizace uranem u těchto hornin lokálně přítomna a v souhře s příznivou hydrogeologickou situací způsobuje aktivaci podzemní vody.

Je poněkud škoda, že z hlediska radiologie voda překračuje normy pro pitnou vodu i kapalně vypustě podle Atomového zákona, ale kritérií vod minerálních podle Lázeňského zákona ještě nedosahuje. Vývěř těchto vod se zvýšenou radioaktivitou proto zůstává pouze přírodovědnou raritou, na které je naše země tak bohatá.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Ackerman L., Pašava J., Šípková A., Martínková E., Haluzová E., Rodovská Z., Chrastný V., 2019. Cooper, zinc, chromium and osmium isotopic composition of the Teplá-Barrandien unit black shales and implication for the composition and oxygenation of the Neoproterozoic-Cambrian ocean. *Chem. Geol.*, 521: 59–75.

Drozd K., 1980. *Zpráva o technických postupech z hlediska snížení přítoků do kabelového tunelu v Praze – Holešovicích*. Stavební geologie n.p. Praha, MS Geofond Praha, (P 030660), 7 str.

Filip B., 1957. *Podzemní vody a prameny v okolí Kladna na území listu speciální mapy Kladno – 3952*. Vodopis Československé republiky 168. – Výzk. úst. Vodohospod. Praha.

Haaslahti, J. – Aalto, J. – Oikari, T., 2000. A portable Liquid Scintillation Counter for General LSC and High Sensitivity Alpha-Counting Applications. *J. Radioanal Nucl Chem.*, 243(2): 377–381.

Habrňal L., 1976. *IG průzkum pro kabelovou trasu Holešovice – Čimice*. 154. PÚDIS, 3-0898-0010-06. MS Geofond Praha (P025257).

Habrňal L., 1977. *Doplňující průzkum pro kabelovou trasu Holešovice – Čimice, podchod pod Vltavou – horizontální vrty*. 176. PÚDIS, 3-0898-0032-06. MS Geofond Praha (P026045).

Hazdrová M., 1983. *Základní hydrogeologická mapa ČSSR 1:200 000. List Třeboň*. Ústř. úst. Geol. Praha.

Hynie O., 1963. *Hydrogeologie ČSSR. II, Minerální vody*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 797 str.

Cháb J., Breitr K., Fatka O., Hladil J., Kalvoda J., Šimůnek Z., Štorch P., Vašíček Z., Zajíc J., Zapletal J. 2008. *Stručná geologie základu Českého masivu a jeho karbonského a permského pokryvu*. ČGS, Praha, 284 str.

Kapasová E., 1983. *Vliv podzemních tunelových staveb na hydrogeologické poměry území velké Prahy*. MS kandidátská disertační práce PřF UK/ Ústřední ústav geologický, Praha, (P000102/1983), 153 str.

Krásný J., 2012. *Podzemní vody České republiky Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. Česká geologická služba, Praha, 1144 str.

Kolman F., 1991. Propustnost a průtočnost předvariských hornin ve středních, v jižních a západních Čechách. *Sbor. Geol. Věd*, Praha, 19: 65–94.

Kovanda J., Balatka B., Mašek J., Havlíček V., Kachlík V., Kříž J., Chlupáč I., Holub V., Zelenka P., Tomášek M., Brunnerová Z., Bernard J.H., Kaprasová E., Kadlecová R., Kleček M., Král J., Kaprasová E., Kadlecová R., Kleček M., Král J., Lochmann Z., Šalanský K., Březinová., Bukovanský M., Lysenko V., Cílek V., Fridrichová M., Hrdlička L., 2001. *Neživá příroda Prahy a jejího okolí*. Academia. 300 str.

Kurzweil F., Drost K., Pašava J., Wille M., Taubald H., Schoeckle D., Schoenberg R., 2015. Coupled sulfur, iron and molybdenum isotope data from black shales of the Teplá-Barrandian unit argue against deep ocean oxygenation during the Ediacaran. *Geochim. Cosmochim. A.*, 171: 121–142.

Marešová Z., 1974. *Průzkum uranonosnosti silurských uloženin v Barrandienu*. MS Rigorozní práce PřF UK Praha. 86 str.

Moučka Š., Cupal P., 2017. *Sanace KT Holešovice, I. Etapa* MS KO-KA s.r.o. 30 str.

Mrázek P., Pouba Z., 1995. Metallogenesis. In: Dallmeyer R.D., Franke W., Weber K. (eds.) *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, str. 411-414.

Neznan M., 2013. *Dokumentace pro uvádění radionuklidů do životního prostředí – vypouštění odpadní vody z kabelového tunelu Holešovice do Vltavy. v osnově podle písm. H přílohy zákona č. 18/1997Sb., ve znění pozdějších předpisů*. MS RADON v.o.s., 7 str.

Olmer M., Kessl J., 1990. Hydrogeologické rajóny. *Práce a studie* 176, Výzkumný Ústav Vodohospodářský, Praha, 154 str.

Pates J.M., Mullinger N.J., 2007. Determination of ^{222}Rn in fresh water: Development of a robust method of analysis by α/β separation liquid scintillation spectrometry. *Appl Radiat Isot.*, 65: 92–103.

Pašava J., Hladíková J., Dobeš P., 1996. Origin of Proterozoic Metal-Rich Black Shales from the Bohemian Massif, Czech Republic. *Econ. Geol.*, 91: 63–79.

Pašava J., Sulovský P., Kovalová M., 1993. Geochemistry and mineralogy of proterozoic metal-rich black shales from the Bohemian massif, Czech Republic, with a description of possible new molybden selenide and telluride phases. *Can. Min.*, 31: 745–754.

Petránek J., 1993. *Malá encyklopedie geologie*. Nakladatelství Jih České Budějovice, 246 str.

Pilátová H., 2013. *Protokol o zkoušce č. 44/2013, Měření obsahu přírodních radionuklidů*. Státní ústav radiační ochrany, MS SÚRO, 473/2013/220, 3 str.

Röhlich P., Fediuk F., 2005. *Ordovik a proterozoikum trojské kotliny*. Exkurzní průvodce. Česká geologická společnost Praha. 14 str.

Stackelberg P.E., Szabo Z., Jurgens B.C., 2018. Radium mobility and the age of groundwater in public-drinking-water supplies from the Cambrian-Ordovician aquifer system, nord-central USA. *Appl. Geochem.*, 89: 34–48.

Stárková M., Halodová P., Mrázová Š., 2018. Geneze neoproterozoických silicitů (bulžníků) s tzv. stromatolitovými texturami na území Brd. *Zprávy o geologických výzkumech* 51(1): 57-62.

Sturchio N.C., Banner J.L., Binz C.M., Heraty L.B., Musgrove M., 2001. Radium Geochemistry of Ground Waters in Paleozoic Carbonate aquifers, Midcontinents, USA. *Appl. Geochem.*, 16: 109–122.

Szabo Z., dePaul V.T., Fischer J.M., Kraemer T. F., Jacobsen E., 2012. Occurrence and geochemistry of radium in water from principal drinking-water aquifer systems of the United States. *Appl. Geochem.*, 27(3): 729-752.

Škábová M., Rovenská Navrátilová K., 2014. *Závěrečná zpráva za 2. Etapu měření radioaktivity na pracovišti Kabelový tunel Holešovice*. MS SÚRO, 6 str.

www stránky

<https://mapy.geology.cz/geocr50/> 20. 12. 2020

Příloha 1.

Pozice vývěřů, fyzikální parametry a naměřené aktivity ^{222}Rn a ^{226}Ra ve vodě v kabelovém tunelu Holešovice mezi šachtami J256 a J27 před provedením sanace, 31. 5. 2019.
 Hodnoty průtoku významných přítoků uvedeny **tučně**. *) Ve směru spádu kabelového tunelu

č. vývěru	metráž [m]	strana*	průtok [l/s]	teplota [°C]	EC [μS/cm]	pH	Eh (ORP _{AgCl}) (měřený) [mV]	Eh (ORP _H) (vypočtený) [mV]	A ^{222}Rn [Bq/l]	σ [Bq/l]	A ^{226}Ra [Bq/l]	σ [Bq/l]	poznámka
1	45	zleva	0,01	11,7	1 084				549	17	1,90	0,15	
2	46	zprava	0,01	11,9	1 183	6,00	85	301					
3	46	zleva	0,005	12,2	1 011	6,26	154	370					
4	48,5	zleva	0,01	11,7	1 018	7,15	182	398					
5	50	zprava	0,01	12,1	789	7,29	149	365					
6	55	zprava	0,05	11,9	790	7,48	133	349	918	22	3,03	0,18	
7	58	zprava	0,03	11,9	780								
8	60,5	zprava	0,3	11,8	764	7,36	193	409	705	19	1,76	0,14	
9	63	zleva	0,01	11,6	895				585	17	0,85	0,10	sráží se karbonátový sintr
10	63,5	zleva	0,02	11,6	938								Fe-Mn sintr
11	64	zprava	0,01	11,9	999								
12	66	zleva	0,02	11,6	934								
13	74	zleva	0,01	11,7	939								z vývrtu ve stěně
14	76	zleva	0,01	11,8	927								sráží se karbonát a Mn oxidy
15	83	zleva	0,02	11,8	883								měkké Fe hydroxidy
16	86	zprava	0,07	11,7	1 087	7,15	125	341	736	19	4,69	0,23	měkké Fe hydroxidy
17	91	zprava	0,03	11,8	899	7,20	165	381	1195	25	1,97	0,15	měkké Fe hydroxidy
18	100	zleva	0,02	11,5	740	7,32	202	418	929	22	0,18	0,04	

Příloha 2.

Pozice vývěřů, fyzikální parametry a naměřené aktivity ^{222}Rn a ^{226}Ra ve vodě v kabelovém tunelu Holešovice mezi šachtami J256 a J27 po provedení sanace, 28. 1. 2020. Hodnoty průtoku významných přítoků uvedeny **tučně**, odhadované průtoky uvedeny *kurzívou*. *) Ve směru spádu kabelového tunelu.

č.vývěru	metráž [m]	strana*	průtok [l/s]	teplota [°C]	EC [μS/cm]	pH	Eh (ORP _{AgCl}) (měřený) [mV]	Eh (ORP _H) (vypočtený) [mV]	A ^{222}Rn [Bq/l]	σ [Bq/l]	A ^{226}Ra [Bq/l]	σ [Bq/l]	poznámka
1	0	KT šachta J27	0,100	11,1	866	6,76	119	335	0,4	0,1	0,8	0,1	celkový přítok ze šachty
2	46	zprava	0,071	12,2		7,46	-30	186	415	13	4,5	0,2	voda chuti karbonáto- síranové
3	47	zprava	0,055	12,2	809	7,11	-39	177	457	14	3,2	0,2	
4	47,5	zprava	<i>0,010</i>	12,2	814								přítok ze stěny
5	49	zprava	<i>0,020</i>	12,2	815	7,16	-30	186					
6	53	zprava	0,050	12,2	817	7,05	16	232	959	20	3,1	0,2	
7	54,5	zprava	0,095	12,1	811	7,20	7	223	971	20	3,5	0,2	vzorek na chemickou analýzu
8	56,5	zleva	<i>0,015</i>	11,9	904	7,20	96	312					nová trubka ze stěny
9	57,5	zleva	<i>0,010</i>	11,9	883								nová trubka ze stěny
10	57,5	zprava	<i>0,020</i>	11,9	795				809	18	2,9	0,2	součtový průtok ze dvou vývěřů, nová trubka ze stěny
11	59	zprava	0,072	12,0	745	7,16	57	273	962	20	1,3	0,1	
12	61	zprava	0,050	12,0	831	7,23	57	273	834	19	1,4	0,1	
13	62	zprava	<i>0,010</i>	12,0	816	7,39	65	281					
14	79	zprava	0,006	12,3	1071								
15	84	zprava	<0,01	12,0	1066	7,23	-24	192	856	19	5,3	0,2	
16	90	zprava	<i>0,020</i>	12,1	1151	7,26	-13	203	896	19	3,4	0,2	
17	97	zprava	<i>0,020</i>	12,0	739	7,34	44	260	985	20	0,4	0,1	
18	100	zprava	<i>0,010</i>	11,9	703	7,22	44	260					
19	101	101-kanál	2,000	12,0	883	7,38	-9	207	325	12	3,3	0,2	součtový odtok ve žlábků

Příloha 3.

Chemická analýza odebraného vzorku podzemní vody a porovnání s archívními údaji.

kód		KT 54.5m	J256 Archivní analýza
lokality		Čimice	Kobylisy
datum odběru		28.01.2020	Habrňal 1976
kationty	jednotka	hodnota	hodnota
Li	[mg/l]	0,029	n.a.
Na	[mg/l]	17,3	147
K	[mg/l]	2,41	10
NH ₄	[mg/l]	n.a.	2,6
Mg	[mg/l]	37,8	9,6
Ca	[mg/l]	110	24,3
Ba	[mg/l]	0,053	n.a.
Sr	[mg/l]	0,222	n.a.
Fe	[mg/l]	0,257	1,5
Mn	[mg/l]	0,131	0,1
Al	[mg/l]	< 0,005	n.a.
Ti	[mg/l]	0,346	n.a.
mikroprvky			
V	[μg/l]	0,135	n.a.
Cr	[μg/l]	< 1	n.a.
Co	[μg/l]	3,52	n.a.
Ni	[μg/l]	3,62	n.a.
Cu	[μg/l]	< 1	n.a.
Zn	[μg/l]	2,36	n.a.
Cd	[μg/l]	< 1	n.a.
Mo	[μg/l]	2,85	n.a.
Ag	[μg/l]	0,028	n.a.
Pb	[μg/l]	0,145	n.a.
Bi	[μg/l]	0,029	n.a.
anionty			
F	[mg/l]	0,21	n.a.
Cl	[mg/l]	24,5	88,9
Br	[mg/l]	< 0,2	n.a.
SO ₄	[mg/l]	81	181,6
NO ₂	[mg/l]	n.a.	n.a.
NO ₃	[mg/l]	< 0,2	0
PO ₄	[mg/l]	0,043	n.a.
HCO ₃	[mg/l]	415	140,3
nedisociované			
H ₂ SiO ₃	[mg/l]	12,6	n.a.
H ₃ AsO ₄	[μg/l]	1,25	n.a.
celková mineralizace	[mg/l]	702	606
radiologie			
Th	[μg/l]	0,032	n.a.
U	[μg/l]	10,8	n.a.
²²⁶ Ra	[Bq/l]	3,5	n.a.
²²² Rn	[Bq/l]	971	n.a.
fyz. parametry			
teplota	[°C]	12,1	n.a.
Eh (ORP _{AgCl})	[mV]	7	n.a.
Eh (ORP _H)	[mV]	223	n.a.
konduktivita	[μS/cm]	811	n.a.
pH - terén		7,20	n.a.
pH - laboratoř		6,95	8,2